

論文 硬化を制御したエポキシ樹脂で被覆した PC 鋼より線を用いた PC 梁の力学的特性

武田三弘^{*1}・大塚浩司^{*2}・犬飼晴雄^{*3}・材寄 勉^{*4}

要旨：本研究は硬化を制御した常温硬化型のエポキシ樹脂で被覆した PC 鋼より線を用いて PC 梁を作製し、シース内の樹脂が硬化する過程で載荷履歴を与えた場合と、樹脂の硬化が終了してから載荷した場合との梁のひび割れ性状やたわみ性状を比較する実験を行った。その結果、シース内の樹脂が硬化する過程で荷重履歴を受けると、樹脂と PC 鋼より線との付着が弱められる可能性があることが分かった。

キーワード：アフターボンド PC 鋼材、PC 鋼より線、エポキシ樹脂、付着疲労

1. まえがき

ボンド式ポストテンション工法において、シース内への緊張材の挿入およびグラウトの注入は、工事の複雑化をまねき、さらにグラウト充填の不完全などの問題を生じさせることがある。そこで、近年、PC 鋼より線の表面に3ヶ月～6ヶ月で常温硬化するエポキシ樹脂を塗布し、その上をシースで被覆し一体化した PC 鋼材が開発された（以後この一体化したものをアフターボンド PC 鋼材と呼び、より線単体を意味する場合は PC 鋼より線と呼ぶ）。この鋼材を使用して PC 部材を製作する場合、現場におけるシース内への緊張材の挿入作業およびグラウトの注入作業は不要となる利点がある。製作された部材は、鋼材の緊張時からしばらくの間はシース内の樹脂は硬化していないためにアンボンド式 PC 部材としての特性をもつが、樹脂の硬化とともにボンド式 PC 部材の特性に移行し、供用される時には完全なボンド式 PC 部材となると考えられる。アフターボンド PC 鋼材の基本的な特性はかなり明らかにされており、既に橋梁などに実用されている。しかし、重要でありながらまだ十分には明らかにされていない問題もある。特に、鋼材の緊張後、部材が供用されるまで、一般に、かなりの期間があり、その間、シース内の樹脂が徐々に硬化を進行させている状態で、架設時やその後の作業時に種々の荷重がかかるため、樹脂の硬化が阻害され PC 鋼より線と樹脂との間の付着が低下する恐れがあるという問題である。

緊張した鋼材を定着具で梁端に固定している PC 梁における鋼材の付着特性は、載荷時に曲げ領域に発生するひび割れの性状や梁のたわみ性状によって評価できる。そこで、本研究はアフターボンド PC 鋼材を用いた梁を作製し、シース内の樹脂が硬化する過程で載荷履歴を与えた場合と、樹脂の硬化が終了してから載荷した場合との梁のひび割れ性状やたわみ性状を比較することにより PC 鋼材の付着特性に及ぼす載荷履歴の影響を調べる実験を行った。特に、樹脂の硬化が阻害されている場合には、その影響が、付着疲労特性に顕著に現れると考えられたので、梁に静的載荷した場合と100万回以上の繰り返し載荷をした場合との性状の比較を行った。

*1 東北学院大学 工学部土木工学科、工修（正会員）

*2 東北学院大学 工学部土木工学科、工博（正会員）

*3 株式会社ピーエス 開発技術部（正会員）

*4 神鋼鋼線工業株式会社 開発本部開発部（正会員）

2. 実験概要

2. 1 アフターボンドPC鋼材の概要

アフターボンドPC鋼材は図-1に示すようにPC鋼材に常温硬化型の樹脂を未硬化なグリース状の状態で塗布し、凹凸をつけたポリエチレンシースで被覆したものである。この常温硬化型の樹脂はエポキシ樹脂で硬化促進剤の添加量をコントロールすることにより硬化時期を自由に設定できるものである。今回使用したのは3ヶ月硬化型である。

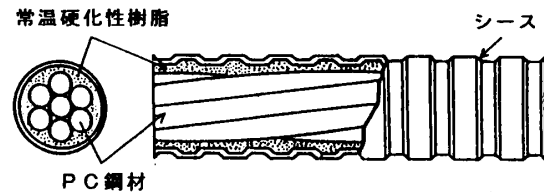


図-1 アフターボンドPC鋼材

2. 2 試験体の形状寸法

実験にはPC舗装版の一部を想定した梁形試験体を用いた。アフターボンドPC鋼材を用いた試験体（記号AF：11体）と、比較材として一般に使われているセメントグラウト充填のPC鋼材を用いた試験体（記号GR：3体）、そしてセメントグラウトが充填されていないPC鋼材を用いた試験体（記号UB：1体）の3種類、計15体を用いた。試験体の形状寸法ならびに配筋状況の一例を図-2に示す。

表-1 コンクリート配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメ ント比 (%)	細 骨 材 率 (%)	単位量(Kgf/m³)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	湿和剤
20	8	37.0	37.5	172	465	616	1060	1.163

表-2 PC鋼より線・異形鉄筋の力学的性質

鉄筋名	公称径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	引張荷重 (Kgf)	降伏荷重 (Kgf)	弾性係数 (Kgf/cm ²)
PC鋼より線	17.8	208.4	41604	38647	19.5×10^4
異形鉄筋	9.53	0.7133	5261	3793	2.1×10^4

2. 3 使用材料

使用したコンクリートの配合を表-1に示す。また、PC鋼より線・鉄筋の力学的性質を表-2、樹脂の硬化後の基礎特性を表-3、アフターボンドPC鋼材とコンクリートとの付着性能について表-4¹⁾に示す。セメントグラウトの4週圧縮強度は土木学会の標準示方書で200 Kgf/cm²以上とされており、表-3から強度はそれらを十分満足している。また、表-4で明らかに、アフターボンドPC鋼材は最大付着応力が59 Kgf/cm²あり、PC鋼より線と同等以上の付着強度を有しており樹脂の硬化後の付着特性には問題ないことが分かる。

表-3 樹脂の硬化後の基礎特性

項目	特性値
圧縮強度	740 Kgf/cm ²
引張強度	230 Kgf/cm ²
弾性係数	82000 Kgf/cm ²

表-4 付着性能

試験体	すべり開始時の荷重 (kgf)	最大引抜き荷重 (kgf)	平均付着強度 (kgf/cm ²)
PC鋼より線12.7mm	2100	4640	45
アフターボンドPC鋼材 12.7mm	3200	6520	59 ㊟

コンクリート圧縮強度：320(kgf/cm²)

㊟すべりは、コンクリートとの間で生じた。

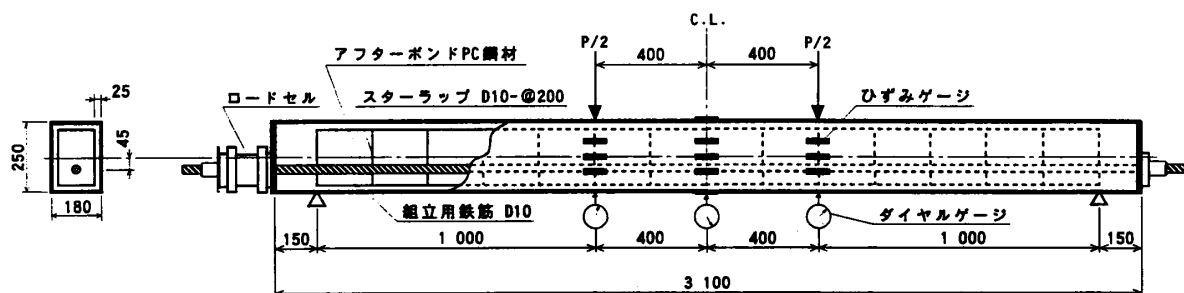


図-2 試験体形状寸法および配筋状況

2. 4 載荷履歴

試験体の載荷は静的載荷（記号：S）と繰り返し載荷（記号：H）に分かれ、それぞれアンボンド状態から載荷されるもの（記号：UB）、ハーフボンド状態から載荷されるもの（記号：HB）、ボンド状態で載荷されるもの（記号：B）に分けられる。付着状態による載荷履歴の一覧を表－5に示す。

表－5 載荷履歴一覧

静的載荷試験				疲労載荷試験			
試験体名	PC鋼より線と樹脂（グーグ）の付着率（%）			試験体名	PC鋼より線と樹脂（グーグ）の付着率（%）		
	0	50	100		20	50	100
AFUB-S1	□	□	■	AFUB-H1	○	○	●
AFUB-S2	□		■	AFUB-H2	○		●
AFHB-S1		□	■	AFHB-H1		○	●
AFHB-S2		□	■	AFB-H1.AFB-H2.GR-H1			●
AFB-S1.AFB-S2.GR-S1.GR-S2			■	UB-H1			●

④ □：10(tf)まで載荷後除荷、■：破壊まで載荷、○：1(tf)～5.8(tf)で10万回載荷後除荷、●：1(tf)～5.8(tf)で100万回載荷後上限荷重を5.8(tf)の2割、4割、6割、8割…増荷重で各1万回づつ破壊まで載荷

2. 5 載荷方法

載荷方法は2点載荷（図－2参照）

とし静的載荷と繰り返し載荷を行った。

静的載荷は手動により1.0tずつ測定を行いながら、履歴計画（表－5の④参照）に従い試験体が降伏・破壊するまで載荷した。繰り返し試験は、設計荷重（ひび割れ発生荷重5.8t）を上限値、下限値を1tとして4Hz（毎分240回）で履歴計画に従い繰り返し載荷を行った。測定は1回、1000回、3000回、5000回、1万回、2万回、3万回、5万回、7万回、10万回、50万回、100万回、そしてそれ以降は1万回毎に載荷を止め、静的にその上限荷重まで載荷し測定を行った。

2. 6 測定項目および測定方法

載荷荷重はロードセルによって、PC鋼より線のひずみは素材表面に貼付防水したストレインゲージによって、PC鋼材軸力は材端に取り付けたロードセルによって、梁のたわみはダイヤルゲージによって、梁表面のひずみはストレインゲージによって、ひび割れ幅はあらかじめ10cm間隔でコンクリート表面に設けておいた標点をコンタクトゲージによって測定した（図－2参照）。

3. 実験結果

3. 1 ひび割れ発生および破壊の状況

図－3は、静的載荷または繰り返し載荷によって梁が破壊に至るまでに発生したひび割れと破壊箇所（図中網掛け）の例を示す。図中のひび割れ本数は載荷点間（800mm）に発生したものをカウントしたものである。ひび割れの間隔にはやや相違が見られたが、ひび割れ発生荷重には大差が見られなかった。表－6は、静的載荷した梁のひび割れ発生荷重や破壊荷重等の測定結果を示す。

静的載荷で破壊した梁は、載荷履歴の有無に関わらず、全てほぼ同じ荷重でコンクリートの曲げ圧縮破壊により破壊した。表－7は、繰り返し載荷した梁のひび割れ発生荷重や破壊時の荷重及び破壊時の繰り返し載荷回数等を示す。繰り返し載荷した梁は、荷重履歴の有無に関わらず、設計荷重（5.8t）を100万回載荷した段階までには破壊せず、その後の割増し荷重での繰

表－6 実験結果一覧（静的載荷）

試験体名	コンクリート 圧縮強度 (kgf/cm ²)	ひび割れ 発生荷重 (tf)	破壊荷重 (tf)
AFUB-S1	439	6.80	13.20
AFUB-S2	439	7.12	13.20
AFHB-S1	439	6.84	13.36
AFHB-S2	462	7.00	13.14
AFB-S1	462	6.60	13.40
AFB-S2	456	6.46	14.00
GR-S1	344	7.00	12.00
GR-S2	344	6.58	12.00

表－7 実験結果一覧（繰り返し載荷）

試験体名	コンクリート 圧縮強度 (kgf/cm ²)	ひび割れ 発生荷重 (tf)	破壊回数 (回)	破壊荷重 (tf)
AFUB-H1	427	6.80	1052434	12.76
AFUB-H2	427	7.10	1052040	12.76
AFHB-H1	439	7.00	1051600	12.76
AFB-H1	462	7.00	1054377	12.76
AFB-H2	462	8.00	1054542	12.76
UB-H1	349	7.00	1040409	11.60
GR-H1	349	6.00	1042116	11.60

り返し載荷によって破壊し、その破壊荷重および破壊時の載荷回数には大差がなかった。これらのことからアフターボンドP C鋼材を使用した梁のシーす内の樹脂が硬化する過程での載荷履歴の影響は、ひび割れ性状には見られるが、樹脂が硬化して後の梁の終局耐力には見られないと考えられる。

3. 2 ひび割れ性状

(1) ひび割れ間隔

アフターボンドP C鋼材のシーす内の樹脂の硬化の過程で受ける載荷履歴が梁に発生したひび割れの間隔に及ぼす影響を調べた結果は次の通りである。表-8

は、樹脂の硬化率（硬化過

程の各段階で載荷した際に梁端部におけるP C鋼より線の緊張力の増加量をロードセルによって測定し硬化率を推定した）とその時点で荷重10 tまで静的に載荷された場合、および樹脂が完全に硬化してから載荷された場合のそれぞれの梁の平均ひび割れ間隔の測定結果を示したものである。この表から分かるように、樹脂の硬化過程で載荷履歴を受けた梁（AFUB, AFHB）は、樹脂が完全に硬化してから載荷した梁

（AFB）よりも平均ひび割れ間隔が約21%大きくなっている。アンボンドP C梁のひび割れ間隔がボンド梁のそれよりも大きくなることは良く知られているが、その差がこの場合、あまり大きくなかったのは、組立筋として引張り側に異形鉄筋（D10）を2本配置していたために、そのひび割れ分散効果があったのではないかと考えられる。載荷履歴を受けた梁がその後樹脂が完全に硬化してから再び載荷した場合には、付着により新たなひび割れが発生し、平均ひび割れ間隔が減少するものと考えられたが、実測ではそれに変化がなかった。このことから、荷重履歴によって、樹脂とP C鋼より線との付着が弱められている可能性があるものと考えられる。表-9は、樹脂の硬化率とその時点で設計荷重（5.8t）で10万回づつのくり返し載荷をした場合の平均ひび割れ間隔の測定結果を示したものである。なお、硬化率100%の欄の値は設計荷重で100万回載荷した後のものである。この表から分かるように、樹脂の硬化の過程で

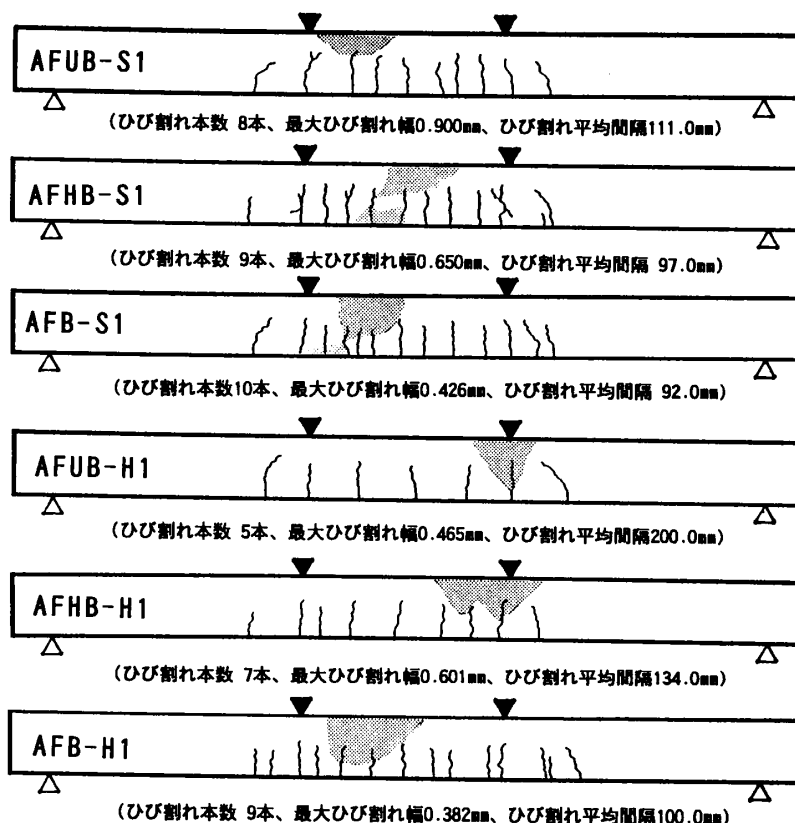


図-3 試験体ひび割れ性状

表-8 ひび割れ間隔

(静的) 試験体名	硬化率 %		
	0	50	100
AFUB-S1	111	111	111
AFUB-S2	133		133
AFHB-S1		97	97
AFHB-S2		116	116
AFB-S1			92
AFB-S2			96
GR-S1			100
GR-S2			95

(mm)

表-9 ひび割れ間隔

(繰返) 試験体名	硬化率 %			
	0	50	60	100
AFUB-H1	200		200	200
AFUB-H2	205			164
AFHB-H1		134		134
AFB-H1				100
AFB-H2				103
UB-H1				157
GR-H1				112

(mm)

繰り返し載荷履歴を受けた梁（AFUB, AFHB）は、樹脂が完全に硬化してから繰り返し載荷した梁よりも平均ひび割れ間隔が64%も大きい。特に、硬化率0%の時点で繰り返し載荷を受けた梁の場合はおおよそ2倍の平均ひび割れ間隔となっている。アンボンド梁のひび割れ間隔がボンド梁のそれよりも大きくなるのは当然であるが、静的載荷の場合よりもその差が大きかった。これは、繰り返し載荷の荷重が5.8tであり、静的載荷時の10tよりもかなり小さくひび割れが十分には発生し終わっていなかったとも考えられる。この場合でも、載荷履歴を受けた梁の樹脂が完全に硬化してから再び100万回の繰り返し載荷をした場合にも1体（AFUB-H2）に1本のひび割れが発生したのみで、平均ひび割れ間隔に変化はなかった。

（２）ひび割れ幅

アフターボンドP C鋼材のシース内の樹脂の硬化の過程で受ける載荷履歴が梁に発生したひび割れの幅に及ぼす影響を調べた結果は次の通りである。

樹脂の硬化過程で載荷履歴を受けた梁は、樹脂が完全に硬化してから載荷した梁よりも最大ひび割れ幅が約50%大きくなっていた。これはばらつきもあるが、ひび割れ間隔が違うためと考えられる。しかし、荷重履歴を受けた梁を、樹脂が完全に硬化してから再び静的載荷した場合にも、ひび割れ幅に変化は見られなかった。

図-4 (a)は、設計荷重（5.8 t）で10万回づつの繰り返し載荷をし、100万回まで載荷した場合の最大ひび割れ幅の測定結果を示したものである。図-4 (b)は、その後荷重を20%ずつ割増して各1万回ずつ破壊まで載荷した場合のひび割れ幅の測定結果を示したものである。この（a）図から分かるように樹脂の硬化過程で載荷履歴を受けた梁も、樹脂が完全に硬化してから載荷した梁も、いずれも100万回までの載荷でひび割れ幅にほとんど変化が見られない。このことから、設計荷重程度の荷重による100万回の繰り返しでは付着疲労による鋼材の滑り出しはないものと考えられる。しかし、（b）図からは、その後の割増し荷重載荷時には荷重履歴の影響が見られる。すなわち、荷重履歴を受けている梁のひび割れ幅がやや大きくなる傾向が見られた。これは、荷重が高くなると付着の弱められている影響が現れてくるのではないと思われる。

3. 3たわみ性状

アフターボンドP C鋼材のシース内の樹

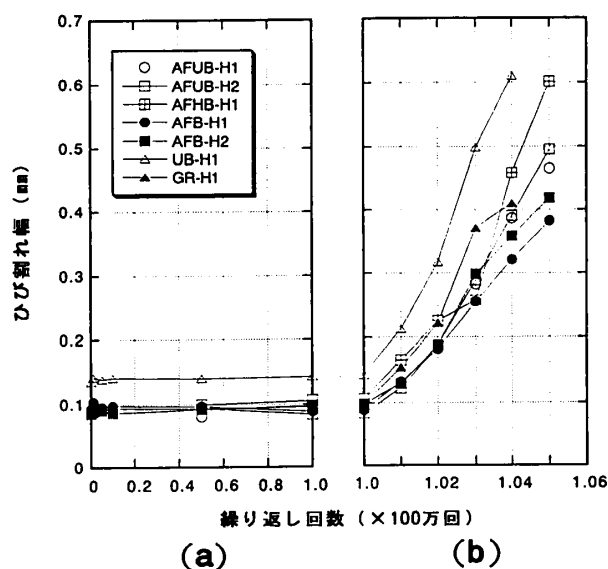


図-4 ひび割れ幅－載荷回数の関係

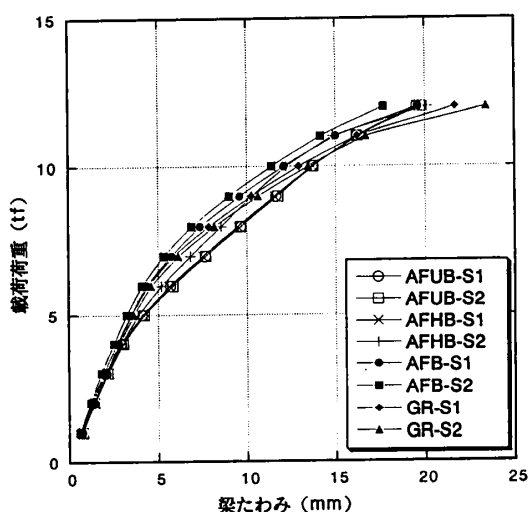


図-5 載荷荷重－梁たわみの関係

脂の硬化の過程で受ける載荷履歴が梁のたわみ性状に及ぼす影響を調べた結果は次の通りである。図-5は樹脂の硬化前に、10 tまで静的に載荷された場合の梁中央底面のたわみを測定した結果を示したものである。この図から分かるように、樹脂の硬化過程で載荷履歴を受けた梁（AFUB、AFHB）と樹脂が完全に硬化した後に載荷した梁（AFB）との間には顕著な差が見られなかった。図-6は、設計荷重（5.8t）で10万回ずつの繰り返し載荷をした梁を、100万回まで載荷した場合のたわみの測定結果を示したものである。図-6（b）は、その後荷重を20%ずつ割増して各1万回ずつ破壊まで載荷した場合のたわみの測定結果を示したものである。（a）図から、荷重履歴に関わらず100万回の繰り返し載荷を受けてもたわみの変化は見られない。また（b）図からも、アンボンドの比較材はややたわみの増加が見られるが、その他の梁には顕著な差は見られなかった。

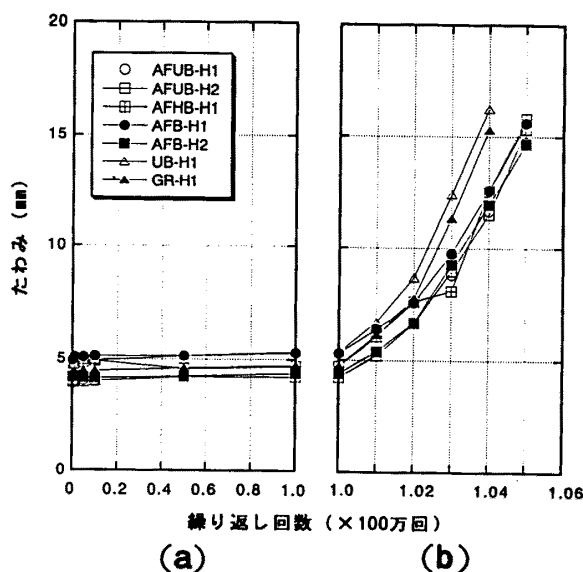


図-6 梁たわみ-載荷回数の関係

4. まとめ

アフターボンドP C鋼材を用いた梁型供試体によって、シーす内の樹脂の硬化過程で受ける荷重履歴がP C鋼より線と樹脂との付着特性に及ぼす影響を調べた結果、実験の範囲内で次のことがいえる。

（1）静的載荷した梁のひび割れ発生荷重や破壊荷重には、樹脂の硬化過程での載荷履歴の有無による差が見られなかった。また、繰り返し載荷を100万回以上行った梁の破壊荷重および繰り返し載荷回数にも、樹脂の硬化過程における載荷履歴の有無による差は見られなかった。

（2）樹脂の硬化過程で載荷履歴を受けた梁は、受けない梁に比べてひび割れ間隔が20～50%程度大きくなった。これは、アンボンド状態で載荷されたためであると考えられる。また、樹脂の硬化過程での載荷により発生したひび割れ間隔はその後樹脂が完全に硬化してから静的載荷あるいは繰り返し載荷されても、新しいひび割れがほとんど発生せず、変化しなかった。これは、載荷履歴により、樹脂とP C鋼より線との付着が弱められている可能性を示すものと考えられる。

（3）樹脂の硬化過程で載荷履歴を受けた梁の最大ひび割れ幅は約50%大きかった。これは、ひび割れ間隔が大きくなることに関連していると考えられる。また、荷重履歴に関わらず、梁に発生したひび割れの幅は、樹脂が完全に硬化して後の100万回の設計荷重の繰り返し載荷によってほとんど変化を生じなかった。しかし、その後の割増荷重の繰り返し載荷によって載荷履歴のある梁の最大ひび割れ幅がやや増加する傾向が見られた。

（4）樹脂の硬化過程での載荷履歴の有無は、梁のたわみ性状にはほとんど差を生じなかった。

参考文献 1) 材寄勉・南敏和・小林剛：アフターボンドP C鋼材の諸特性について、プレストレストクリート, Vol. 32 No. 4 Jul. 1990 pp. 91～pp. 98